

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510181

研究課題名(和文)固有ジョセフソン接合の層平行磁場下でのテラヘルツ発振

研究課題名(英文)THz emission from intrinsic Josephson junctions under the layer parallel magnetic field

研究代表者

羽多野 毅 (Hatano, Takeshi)

独立行政法人物質・材料研究機構・超伝導物性ユニット・グループリーダー

研究者番号：50354337

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：酸化物高温超伝導体は、層状ペロブスカイト結晶構造を有する。その中でもBi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d}は、2枚のCuO₂面からなる超伝導層間に、SrO-BiO-BiO-SrOの4原子層からなる絶縁層が挟まり、ジョセフソン素子として動作する。結晶のc軸方向には多数のジョセフソン接合がアレイを形成している。さらに、高温超伝導体の高い超伝導遷移温度を反映して、超伝導エネルギー・ギャップが1桁大きいことから、交流ジョセフソン振動数の上限が、金属系の~1 THzに対して、10 THzへと広がっている。これらが位相整合して発振させて、0.3~1THz周波数領域の新たな光源を試作した。

研究成果の概要(英文)：High-T_c superconducting oxides have layered Perovskite crystal structures. Among these, in highly anisotropic Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d}, “superconducting” CuO₂ double layers are interleaved with “insulating” SrO-BiO-BiO-SrO layers. Such an alternating layered structure was found to exhibit a “Josephson effect”. Namely, a device structure is naturally embedded in the crystals. The number of Josephson junctions in a crystal having a thickness of 1 μm is as much as 650, which can never be realized by a thin film fabrication technique.

Furthermore, the energy gap of a high-T_c superconductor is one order larger than that of a conventional metal superconductor (Nb), which results in the generation of a one order higher frequency microwave becoming possible, i. e. from 1 THz to 10 THz from the enormous number of junctions in the array. Thus, one can expect a powerful THz generation from a Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8+d} single crystal.

研究分野：超伝導物性

キーワード：固有ジョセフソン接合 空洞共振 テラヘルツ 交流ジョセフソン効果 ビスマス系高温超伝導体

1. 研究開始当初の背景

ビスマス系高温超伝導体は 1988 年に当研究機関において発見され、1992 年には日独で独立に固有ジョセフソン効果の発現が確認された。高温超伝導体の結晶構造に接合が膨大な数のアレイを形成していることから、数を利しての THz 発振素子開発に期待がかった。コヒーレントな N 接合からの放射エネルギーが N^2 倍になることが期待された。即ち、1 接合では出力 1nW であっても、1000 接合では 1mW が得られ、THz 光源として応用に供することが期待される。この 1000 接合が厚さ 1.5 μm の結晶に内蔵されているのである。

すべての接合を同期発振させる必要性から、磁束量子、特に接合に平行に印加された磁界により形成される“ジョセフソン磁束の形成する格子”を利用する方法が提案され、ジョセフソン磁束が接合電流によりローレンツ力を受けて接合面内を電磁波レベルの速度で運動（磁束フロー）する現象の研究が盛んになった。接合サイズ・バイアス電流・磁場強度・磁場と接合のなす角度・温度等々をパラメータとして我が国を中心に研究が進められた。当 G では、0.5-1THz の FISKE 共鳴発振を観測するに至った。(APL 89, 252506 (2006)) 空間への THz 外部放射観測こそ米国アルゴンヌ研究所の巨大メサの後塵を拝する結果となったが、当 G はその巨大メサ（当 G の接合スタックと比べて接合列の体積は $10^4 \sim 10^5$ 倍）・ゼロ磁場条件での THz 放射実験でも、(1)高バイアス条件の発見、(2)定在波パターンの可視化（低温レーザー顕微鏡観察）による発振機構の特定、などこの分野の発展を担ってきた。(PRL 102, 017006, (2009), PRL 105, 057002, (2010))

発振メカニズムが、交流ジョセフソン効果とキャビティ共鳴が一致する条件であることは間違いない。しかし、その詳細は解明されていない。ジョセフソン・プラズマが励起され、それが THz 電磁波をポンピングしているのか、単に結晶中の電磁波がポンピングされているのかを明らかにする必要がある。前者の場合、N 個の固有ジョセフソン接合列に存在する N 個の固有モード（ジョセフソン・プラズマのモード）の内、 $n=1$ 番目の全接合がコヒーレントなモードをポンピングしていることになる。

2. 研究の目的

高度情報化社会の実現に向けて、高速性・低消費電力性・集積度の何れの頭にも“超”を冠することのできるデバイスの探索が喫緊の課題である。ビスマス系高温超伝導体のような高い異方性を有する層状物質では、結晶構造そのものがジョセフソン接合として働き、固有ジョセフソン接合と呼ばれている。図 1 のように接合が結晶の完全性と 1.5nm での並進対称性をもって 3 次元的に整列していることから、格好の超高集積デバイス候補である。

超伝導デバイスがシリコンに比してそれぞれ 2 桁の超高速性と超低消費電力性を併せ持つことを考えれば、画期的なポストシリコンテクノロジー候補である。

本提案課題では、固有ジョセフソン接合における“超高周波”テラヘルツ (THz) 発振条件の探索を行う。特に当 G が発見し系統的な研究を行ってきた層平行磁場下における接合の平面形状をキャビティ（共鳴箱）とする“FISKE 共鳴” (PRB 72, 140504R (2005)) を踏まえて、現在実際にゼロ磁場で THz 空間放射が観測されている 30-100 μm キャビティ・サイズの接合スタックを用いて探索を行う。超伝導エネルギーギャップが、ニオブや鉛に比べて 1 桁高い高温超伝導体では、ギャップに起因する周波数限界も一桁高い数 THz に及んでいることが既に遠赤外光への応答により立証されており、能動素子としての新型 THz 光源が待望されている。

当 G では磁界中においては、ジョセフソン磁束のフロー速度が、理論的に求められる $n=1$ のジョセフソン・プラズマの位相速度より、1-2 桁低い速度までしか加速されず、準粒子トンネル状態に遷移することから、 $n=1$ のコヒーレントな状態は実現されていないと考えてきた。(PRB 72, 174514, (2005)) しかし、層平行磁場下でもメサの平面形状に外部放射される電磁波の波長をキャビティ設計条件に取り入れることで、単に結晶中の電磁波がポンピングされて THz 波が放射していることが立証出来れば、メカニズムは後者であることになる。

層平行磁場を用いることで、磁束格子の形成により接合間のコヒーレンスが逆に向上して、より高強度・狭線幅の THz 放射が得られれば、応用に向けて大きな前進となる。

3. 研究の方法

層状酸化物高温超伝導体 Bi2212 単結晶にメサ加工を施して THz 共鳴機能を持たせた固有ジョセフソン接合スタックを試作し、超伝導マグネット/精密試料回転機構付きクライオスタットにより、電流-電圧特性の温度・磁界強度・磁界と接合のなす角度依存性を評価し、電流バイアスによる電圧発生に基づく交流ジョセフソン効果を接合スタックの共鳴周波数に一致させることで THz 放射の条件を探索する。さらに、THz 光学窓付きクライオスタット（既存装置：スプリット超伝導マグネットを搭載）を THz 準光学測定・分光システム（既存装置）と結び、層平行磁場下における THz 放射の強度を最適化する条件を探る。同時に分光分析により、よりコヒーレントな放射の条件を探る。

4. 研究成果

酸化物高温超伝導体は、層状ペロブスカイト結晶構造を有する。その中でも $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ は、2 枚の CuO_2 面からなる超伝導層間に、 SrO-BiO-BiO-SrO の 4 原子層からな

る絶縁層が挟まり、ジョセフソン素子として動作する。結晶のc軸方向には多数のジョセフソン接合がアレイを形成している。さらに、高温超伝導体の高い超伝導遷移温度を反映して、超伝導エネルギー・ギャップが1桁大きいことから、交流ジョセフソン振動数の上限が、金属系の ~ 1 THzに対して、10 THzへと広がっている。これらが位相整合して発振させて、 $0.3\sim 1$ THz 周波数領域の新たな光源を試作する。実験に用いる $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ 単結晶は、浮遊帯移動法により数 mm 系の結晶が作成されるが、実際にはモザイク状の多結晶となっている。モザイクの結晶サイズ、ここでは厚みを確保するために、高純度原料粉を用いて、超低速成長 (4mm/日) させることで、面積 5mm 角・厚さ数 $100\ \mu\text{m}$ の、しかも積層欠陥を含まない結晶の成長に成功して THz 発振実験に用いた。

米国におけるシェール・ガス掘削の急成長による影響を受けて、日本ではヘリウムの需給がひっ迫した。そこで、GM 冷凍機を用いた実験に急遽切り替えるため、冷凍機仕様の THz 放射・分光分析装置を新たに設計・試作した。

冷凍機仕様の装置では、残念ながら磁界の印加ができないため、従来法のゼロ磁界中発振による THz 発振で、発振強度・発振線幅の向上を目指して、上記 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ 単結晶固有ジョセフソン接合発振素子の改良に努め、周波数可変領域 0.3. \sim 1.05THz、最小線幅 6.3MHz を記録して、実用化への道筋をつけた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① 羽多野毅, 王華兵, 固有ジョセフソン接合によるテラヘルツ発振器, 応用物理 84 巻、438-443、2015. 査読有
- ② Rudau, F; Tsujimoto, M; Gross, B; Judd, TE; Wieland, R; Goldobin, E; Kinev, N; Yuan, J; Huang, Y; Ji, M; Zhou, XJ; An, DY; Ishii, A; Mints, RG; Wu, PH; Hatano, T; Wang, HB; Koshelets, VP; Koelle, D; Kleiner, R, **Thermal and electromagnetic properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks studied via one-dimensional coupled sine-Gordon equations**, Phys. Rev. B 91, 2015, 104513, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.91.104513
- ③ Zhou, XJ; Yuan, J; Wu, H; Gao, ZS; Ji, M; An, DY; Huang, Y; Rudau, F; Wieland, R; Gross, B; Kinev, N; Li, J; Ishii, A; Hatano, T; Koshelets, VP; Koelle, D; Kleiner, R; Wang, HB; Wu, PH, **Tuning the Terahertz Emission Power of an Intrinsic Josephson-Junction Stack with a Focused Laser Beam**, PHYSICAL REVIEW APPLIED 3, 2015, 044012 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.3.044012
- ④ Gross, B; Rudau, F; Kinev, N; Tsujimoto, M; Yuan, J; Huang, Y; Ji, M; Zhou, XJ; An, DY; Ishii, A; Wu, PH; Hatano, T; Koelle, D; Wang, HB; Koshelets, VP; Kleiner, R, **Electrothermal behavior and terahertz emission properties of a planar array of two $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ intrinsic Josephson junction stacks**, Supercond. Sci. Technol., 28, 2015, 055004 査読有
DOI: 10.1088/0953-2048/28/5/055004
- ⑤ Wang, P; He, M; Wu, H; Ji, M; Zhou, XJ; Zhao, XJ; Hatano, T; Wang, HB, **Terahertz Waves Emission From Two $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Mesas in Series**, IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, 5, 2015, SI 512-517 査読有
DOI: 10.1109/TTHZ.2015.2402571
- ⑥ Ji, M; Yuan, J; Gross, B; Rudau, F ; An, DY; Li, MY; Zhou, XJ; Huang, Y; Sun, HC; Zhu, Q; Li, J; Kinev, N; Hatano, T; Koshelets, VP; Koelle, D; Kleiner, R; Xu, WW; Jin, BB; Wang, HB; Wu, PH, **$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks with improved cooling: Coherent emission above 1 THz**, APPLIED PHYSICS LETTERS 105, 2014, 122602-1-4 査読有
DOI: 10.1063/1.4896684
- ⑦ Jun Li, Jie YUAN, Ji Min, Gufei Zhang, Jun-Yi Ge, FENG Hai, Yahua YUAN, T. Hatano, Wei Hu, Kui Jin, Tobias Schwarz, Reinhold Kleiner, Dieter Koelle, K. Yamaura, H. B. Wang, Pei-Heng Wu, E. Takayama-Muromachi, Johan Vanacken, Victor V. Moshchalkov, **Impurity effects on the normal-state transport properties of $\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$ superconductors**, PHYSICAL REVIEW B, 90, 2, 024512-1-024512-8,(2014) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.90.024512
- ⑧ Li, J; Yuan, J; Ge, JY; Ji, M; Feng, HL; Yuan, YH; Hatano, T; Vanacken, J; Yamaura, K; Wang, HB; Takayama-Muromachi, E; Moshchalkov, VV, **Depairing current density of $\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Fe}_{1.95}\text{Co}_{0.05}\text{As}_2$ microbridges with nanoscale thickness**, PHYSICA C 503, 2014, 101-104 査読有
DOI: 10.1016/j.physc.2014.03.033
- ⑨ J. Ge, J. Gutierrez, Jun Li, J. Yuan, H. B.

- Wang, K. Yamaura, E. Takayama-Muromachi, V. V. Moshchalkov, **Dependence of the flux-creep activation energy on current density and magnetic field for a $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_3\text{As}_8)[(\text{Fe}_{1-2x}\text{Pt}_x)\text{As}_2]_5$ single crystal**, APPLIED PHYSICS LETTERS, 104, 11, 112603-1-112603-5, (2014) 査読有
DOI: 10.1063/1.4868871
- ⑩ D. Y. An, J. Yuan, N. KINEV, M. Y. Li, Y. HUANG, J. Min, H. ZHANG, Z. L. Sun, L. Ang, B. B. JIN, J. CHEN, J. Li, B. GROSS, A. Ishii, T. Hatano, V. Koshelets, D. KOELLE, R. KLEINER, H. B. Wang, W. W. XU, P. H. WU, **Terahertz emission and detection both based on high-Tc superconductors: Towards an integrated receiver**, Appl. Phys. Lett., 102, 092601, 092601-1-092601-4, (2013) 査読有
DOI: 10.1063/1.4794072
- ⑪ B. GROSS, J. YUAN, D. Y. An, M-Y. Li, N. KINEV, X. ZHOU, J. Min, Y. HUANG, T. Hatano, R. G. MINT, V. Koshelets, P. H. WU, H. B. Wang, D. KOELLE, R. Kleiner, **Modeling the linewidth dependence of coherent terahertz emission from intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime**, Phys. Rev. B, 88, 014524-1-014524-9, (2013) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.88.014524
- ⑫ Sirakant Saini, H. B. Wang, T. Hatano, S.-J. Kim, **An Approach to Use a Raw Single Crystal Whisker as Intrinsic Josephson Junctions Stacks**, JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM, 26, 8, 2709-2712, (2013) 査読有
DOI: 10.1007/s10948-012-2078-z
- ⑬ Li, J; Yuan, J; Yuan, YH; Ge, JY; Li, MY; Feng, HL; Pereira, PJ; Ishii, A; Hatano, T; Silhanek, AV; Chibotaru, LF; Vanacken, J; Yamaura, K; Wang, HB; Takayama-Muromachi, E; Moshchalkov, VV, **Direct observation of the depairing current density in single-crystalline $\text{Ba}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{Fe}_2\text{As}_2$ microbridge with nanoscale thickness**, Appl. Phys. Lett., 103, 2013, 062603 査読有
DOI: 10.1063/1.4818127
- ⑭ J. Li, J. Yuan, D. M. Tang, S. B. Zhang, M. Y. Li, Y. F. Guo, Y. Tsujimoto, T. Hatano, S. Arisawa, D. Golberg, H. B. Wang, K. Yamaura, E. Takayama-Muromachi, **Growth of single-crystal $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{1.8}\text{Pt}_{0.2}\text{As}_2)_5$ nanowhiskers with superconductivity up to 33 K**, J. American Chemical Society 134, 4068-4071 (2012). 査読有
DOI: 10.1021/ja212067g
- ⑮ J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, B. Gross, A. Ishii, K. Yamaura, T. Hatano, K. Hirata, E. Takayama-Muromachi, P. H. Wu, D. Koelle, R. Kleiner and H. B. Wang, **Terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks with all-superconducting electrodes**, Supercond. Sci. Tech. 25, 075015 (2012). 査読有
DOI: 10.1088/0953-2048/25/7/075015
- ⑯ M. Y. Li, J. Yuan, N. Kinev, J. Li, B. Gross, S. Guénon, A. Ishii, K. Hirata, T. Hatano, D. Koelle, R. Kleiner, V. P. Koshelets, H. B. Wang, and P. H. Wu, **Linewidth dependence of coherent terahertz emission from $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ intrinsic Josephson junction stacks in the hot-spot regime**", Phys. Rev. B 86, 060505 (2012). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.060505
- ⑰ B. Gross, S. Guénon, J. Yuan, M. Y. Li, J. Li, A. Ishii, R. G. Mints, T. Hatano, P. H. Wu, D. Koelle, H. B. Wang, and R. Kleiner, **Hot-spot formation in stacks of intrinsic Josephson junctions in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$** ", Phys. Rev. B 86, 094524 (2012). 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.86.094524
- [学会発表] (計 28 件)
- ① Huabing Wang, et al., Terahertz Radiation above 1 THz from Intrinsic Josephson Junction Arrays / Terahertz Radiation above 1 THz from Intrinsic Josephson Junction Arrays, THz-PLASMA2014, Nov. 30-Dec. 3, 2014, Kyoto
- ② Xianjing Zhou, Huabing Wang, et al., Manipulating Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junctions with a Focused Laser Spot / Manipulating Terahertz Emission of Intrinsic Josephson Junctions with a Focused Laser Spot, THz-PLASMA2014, Nov. 30-Dec. 3, 2014, Kyoto
- ③ Huabing Wang, et al., Some effect on improving performance and understanding mechanism of THz emission in intrinsic Josephson junctions, THz-PLASMA2014, Nov. 30-Dec. 3, 2014, Kyoto
- ④ Huabing Wang, et al., "Continuous Wave Coherent Terahertz Radiation above 1 THz from Josephson Junction

- Arrays”, IRMMW-THz Conference 2014, Sept 14-19, 2014, Tucson USA .
- ⑤ Huabing Wang, et al., “CW terahertz emission above 1 THz from high Tc superconductors”, ASC 2014 , Aug. 10-17, 2014 , Charlotte, USA.
- ⑥ Huabing Wang, et al., “THz emitters and detectors both fabricated from high Tc superconductors: Towards an integrated receiver”, ASC Aug. 10-17, 2014 , Charlotte, USA.
- ⑦ 羽多野毅, 王華兵, 固有ジョセフソンテラヘルツ発振素子、超伝導エレクトロニクス第 146 委員会 第 90 回研究会、2014.4.16. 東京 (招待講演)
- ⑧ 羽多野毅, 王華兵, 固有ジョセフソン接合からのテラヘルツ放射, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013.9.23. 徳島
- ⑨ T. Hatano, et al., Phenomenological aspects on THz emission from the intrinsic Josephson junctions, European Society of Applied Superconductivity, Sept. 15-19, 2013 Genova, Italy
- ⑩ Huabing Wang, et al., “Towards Practical Applications of THz Josephson Oscillator with Sub -mW Power and 500 GHz Frequency Tunability”, IRMMW-THz Conference Sept. 14-19, 2013, Mainz Germany .
- ⑪ T. Hatano, et al., Coherent and Powerful Terahertz Radiation from Intrinsic Josephson Junctions in the Hotspot Region, 2nd Workshop on THz Radiation from Intrinsic Josephson Junctions, Aug. 30, 2013 Tsukuba
- ⑫ T. Hatano, et al., Single junction fabrication in intrinsic Josephson junctions by in-situ ion milling near T_c, 2012 ASC conference, Oct. 7-12, 2012, Portland
- ⑬ 羽多野毅, 他、固有ジョセフソン接合の低温イオンミリング加工、2012 年 秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会、2012.9.11-14. 松山
- ⑭ Huabing Wang, et al., “Terahertz emission in intrinsic Josephson junctions-recent progress”, PLASMA2012, Jun 10-14 2012, Izmir, Turkey.
- ⑮ T. Hatano, et al., Current induced lock-in phenomena in Y-123 and Bi-2212 IJJs under

layer parallel magnetic field, PLASMA2012 Jun 10-14 2012, Izmir, Turkey.

他、13 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他] 該当なし
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

羽多野 毅 (Hatano Takeshi)
独立行政法人 物質・材料研究機構 超伝導物性ユニット グループリーダー
研究者番号：50354337

(2) 研究分担者

王 華兵 (Wang Huabing)
独立行政法人 物質・材料研究機構 超伝導物性ユニット 主幹研究員
研究者番号：70421427

(3) 連携研究者 なし

()

研究者番号：